

Patent number: JP11253434
Publication date: 1999-09-21
Inventor: DANIELSSON PER-ERIK
Applicant: KONINKL PHILIPS ELECTRONICS NV
Classification:
- international: A61B6/03; A61B6/03; A61B6/03
- european:
Application number: JP19990006509 19990113
Priority number(s):

W1017

View INPADOC patent family

Also Published : [JP11253434 (A)]EP1000408 (B1)

Abstract of JP11253434

PROBLEM TO BE SOLVED: To implement a complete spiral conical beam operation and obtain non-redundant data by making an actual pre-weighting, actual filter designing and actual magnification depend on a physical example of a detector and reallocation used for data detected.

SOLUTION: A two-dimensional detector 11 is wound around a spiral column 12 to project an object 17, and a new projection is absorbed in a prior result without a boundary and set in. For this purpose, the following general reconstruction procedures for every new projection are proposed: (1) performing reallocation, (2) performing pre-weighting (depending on the reallocation and the type of detector), (3) applying one-dimensional filter processing to the whole detector by use of a lamp filter (when filter designing depends on the reallocation and the type of detector), (4) performing a back-surface projection along the direction of optical light made incident by use of magnification (depending on the type of reallocation, the type of detector such as a plane type, cylindrical type or the like).

W1017

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-253434

(43) 公開日 平成11年(1999) 9月21日

(51) Int. Cl.⁵ 識別記号
A 6 1 B 6/03 3 2 1
3 2 3
3 5 0

F I
A 6 1 B 6/03 3 2 1 Q
3 2 3 A
3 5 0 H

審査請求 未請求 請求項の数9 OL (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願平11-6509

(22) 出願日 平成11年(1999) 1月13日

(31) 優先権主張番号 PCT/SE 98/00029

(32) 優先日 1998年 1月13日

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 590000248

コーニンクレッカ フィリップス エレク
トロニクス エヌ ヴィ

Koninklijke Philips
Electronics N. V.

オランダ国 5621 ペーアー アイन्दー
フェン フルーネヴァウツウェッハ 1

(72) 発明者 ヘル エリク ダニエルソン

スウェーデン国, 584 37 リンケーピン
グ, ヘッドボーンズ ガタ 30

(74) 代理人 弁理士 伊東 忠彦 (外 1 名)

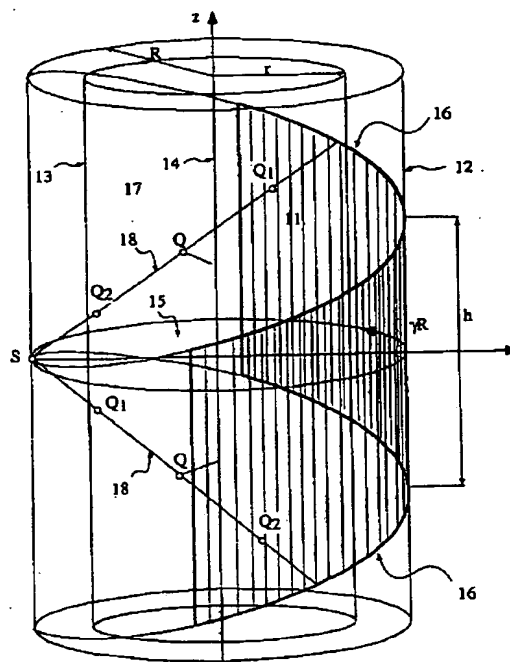
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 断層X線撮像方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、完全な螺旋状円錐形ビーム走査及び非冗長データ取得が実現される任意の長さの対象物の3次元断層X線撮像装置及び方法の提供を目的とする。

【解決手段】 最小サイズの2次元検出器ウィンドウは2回の連続した螺旋の周回によって境界が定められる。光線源は、点から見た場合に正確に180度の回転中に全ての対象物点を照射する。1次元フィルタリングだけが再構成に利用される。回転軸に沿って見た場合の平行ビームへの再割り当ては、事前重み付け又は倍率を必要とすることなく、特に簡単な手続きを実現する。特殊なケースとして、本発明は1次元検出器アレイを用いた螺旋状扇形ビーム走査に適用可能である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、

2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、

上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として形成された表面領域と一致するように拘束され、

上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウの高さは螺旋のピッチと一致し、

上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、

上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、

再構成手続きは、

特定の検出器値を生ずる光線の角度に依存する係数で事前重み付けを行う段階と、

上記検出器の全域で水平方向又は略水平方向にランプフィルタタイプのフィルタでフィルタリングを行う段階と、

元の検出器値を生じた上記光線の方向に沿ってある倍率で背面投影を行う段階とを含む、

実際の事前重み付けと実際のフィルタ設計と実際の倍率は、上記検出器の物理的な実施例と、検出されたデータに利用された再割り当てとに依存することを特徴とする長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項2】 被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、

2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、

上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として形成された表面領域と一致するように拘束され、

上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウの高さは螺旋のピッチと一致し、

上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、

上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、

再構成手続きは、入ってくる円錐状ビーム投影毎に、

上記回転軸に沿って見えるような平行投影に再割り当てする段階と、

上記再割り当てされたデータを上記回転軸上の仮想検出器平面に配置し、再サンプリングする段階と、

上記検出器平面内の全ての水平方向行に沿ってランプフィルタリングを行う段階と、

一定の倍率を用いて元の光線の方向に背面投影する段階とを含むことを特徴とする長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項3】 被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、

2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、

上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として形成された表面領域と一致するように拘束され、

上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウの高さは螺旋のピッチと一致し、

上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、

上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、

再構成手続きは、入ってくる円錐状ビーム投影毎に、

上記回転軸に沿って見えるような平行投影に再割り当てする段階と、

上記再割り当てされたデータを上記回転軸上の仮想検出器平面に配置し、再サンプリングする段階と、

一般化投影及びフーリエ変換技術を用いて同時に一つの水平方向スライス再構成する段階とを含むことを特徴とする長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項4】 有効検出器領域は、上記ウィンドウを通して露光された領域に対応した拡張部を有し、物理的に異なる形状に形成され、異なる位置に配置されていることを特徴とする請求項1乃至3のうちいずれか一項記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項5】 検出器は、垂直平面に配置されていることを特徴とする請求項4記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項6】 検出器は、上記光線源Sを通る垂直軸を備えた円柱体の表面に配置されていることを特徴とする請求項4記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項7】 検出器は、上記光線源Sに中心がある球の表面に配置されていることを特徴とする請求項4記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項8】 検出器は、上記光線源を通り螺旋状円柱体に接する円柱体の表面に配置されていることを特徴とする請求項4記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【請求項9】 検出器は、単一行の検出器素子により構成されていることを特徴とする請求項4乃至8のうちいずれか一項記載の長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法に関する。

【0002】

【従来の技術】断層X線撮像方法及び装置は、[Dan97a]（引用文献のリストを参照のこと）に記載されている。2次元検出器11及び点状の放射線源（例えば、X線源）Sは、図1に示された螺旋状軌道に沿って対象物の周りを同期式に移動する。医用断層X線撮像の場合、螺旋状の放射線源の移動は、回転する放射線源・検出器構造物の中で患者を平行移動させることにより実現される。2次元投影は、軌道上の任意の短い間隔で取得（検出）される。検出器は、平面、或いは、図1に示される如く、螺旋状円柱体12の表面上に等間隔で配置された多数のセンサ（検出器素子）を含む。回転軸14は、通常、医用断層X線撮像に関して水平方向であり、図1に示されるような垂直方向ではないが、本願明細書では次の用法に従って説明する。以下、“垂直方向”とは、図1に示された回転軸（z軸）14に平行な方向を表し、“水平方向”とは、xy平面15に対し平行な方向を表す。

【0003】投影は、一次的に検出器素子に入射する放射線の強度測定値により構成される。この一次データの対数は、光線方向の減衰の合計、すなわち、求めたい3次元減衰関数fに関する線積分を表す。投影から関数fを正確に再構成するためには、対象物の全ての点が完全に露光され、投影データが均衡を保って利用される必要がある。したがって、再構成のため背面投影が利用される場合、いわゆる厳密な再構成を実現すべく、全投影角からの投影が利用可能であり、正確な重みを付けられるべきである。また、投影データは、投影-背面投影処理に本質的に備わる低域フィルタリングを補償するため正確にフィルタ処理される必要がある。

【0004】上記引用文献[Dan97a]において、数通りの数学的に厳密な方法が円錐状ビームからの再構成のため提案されている。殆どの場合、提案された方法は、対象物が有限の拡がりを持つこと、すなわち、寸法が制限され、対象物の全ての投影が利用可能な検出器の範囲内に収まることを要求する。残念ながら、この要求は、殆どのコンピュータ断層X線撮像の場合、例えば、全身、若しくは、一般的に長い対象物を再構成すべき場合に現実的ではない。従来、1次元検出器アレイは、対象物を最大の幅の全体に亘って変換するために十分な長さ

（幅）が与えられる。しかし、幾つかの理由から、1次元検出器を2次元検出器に拡張して、患者の頭からつま先までの全てをカバーすることは問題外であるとされている。その代わりとして、近い将来、利用可能な2次元

検出器が長い対象物の断面の投影をカバーし、記録するため使用される。

【0005】従来、3次元容積データはスライス単位で再構成される。患者は少しずつ（典型的に毎秒2mm）平行移動させられ、同時に、X線源及び1次元検出器アレイが毎秒約1回転の速さで同期的かつ連続的に回転される。移動しない患者に対し、X線源及び検出器は、非常に短いピッチ、例えば、2mmの螺旋運動を行う。この再構成法は、従来の単一スライスの環状走査用の2次元的方法の改良版を利用する。しかし、数値を挙げると、200mm長の身体の断面に対するデータを獲得するために約100秒の時間を要する。この時間中、呼吸並びにその他の身体機能に起因して、身体は完全には静止していないので、再構成された対象物を不鮮明にする。第2の欠点は、X線管の陽極は、長い照射時間中に厳しい負荷と高温に晒されることである。

【0006】1次元検出器システムの場合、発生された光子の大部分は利用されずに視準から遠ざけられ、2次元検出器システムは、光子を浪費することなく、光子の実質的な部分を利用することができる。したがって、例えば、上記例においてn本の平行1次元検出器による2次元検出器を使用することにより、速度を毎秒2nミリまで上昇させ、走査時間を100/n秒まで低下させることができる。或いは、速度はX線源に対する要求と妥協されるので、例えば、光子のフローが半分にされた場合、速度は適度に毎秒nミリ秒まで上昇され、走査時間は200/n秒に低減される。しかし、いずれにしても、従来の2次元的手法の場合、投影光線は放射線源の軌道の1周回中に近似的にも同一平面上に維持されないため、従来の2次元的手法を用いて再構成を行うことは不可能になる。

【0007】・環状放射線軌道について

環状経路に沿って獲得された円錐状ビーム投影から厳密ではない再構成を行う周知の方法は、引用文献[Feld84]に記載されている。2次元検出器は、平面的な表面に設置され、対象物の全幅をカバーするように水平方向に延在する。対象物の全幅及び放射線源までの距離は、放射線源・検出器系の最大の扇形角度 γ_{max} を決める。垂直方向に関し、平面的な検出器は2本の水平線によって制限される。これらの水平線が放射線源に最も接近する垂直軸に沿って、最大円錐角度が見つけられる。画像再構成は、検出器の記録毎に行われる以下の段階を含む。絶えず必要な対数計算を含む幾何学的並びに放射性の性質の全ての補正は、説明を簡単にするためここでは除かれている。

【0008】1. 記録された検出器データを、中心の光線と検出された値を発生させた光線との間の角度の余弦に比例する係数で事前重み付けをする。

2. 水平方向の検出器の行毎に従来のランプフィルタリング技術を用いてフィルタリング処理する。

3. 元の光線に沿って背面投影し、その処理中に、フィルタ処理された検出器値は、元の光線からの寄与分を受信するため放射線源と対象物の点との間の距離に依存する倍率で乗算される。

【0009】この方法は、対象物の中央部分又はその付近の画像スライスに対し完全な結果を与える。より大きい円錐角の非常に傾いた光線が当てられたスライスの場合、画質は劣化する。

・螺旋状放射線軌道（厳密ではない方法）について
上記引用文献[Feld84]の螺旋状放射線源経路への拡張は、引用文献[Wanq93]において提案されている。この引用文献によれば、平面的な2次元検出器は、360度の放射線源の1回転中に各投影角毎に少なくとも1回ずつ各点が放射線源からの照射を受けることができるよう十分に広く垂直方向に拡張される。この条件の効果として、任意の投影角度に対し、対象物の点は、与えられた扇形角度、コーン角度及び検出器サイズに依存して、少なくとも1箇所、大抵は非常に多数箇所の種々の放射線源の位置からの放射線源の放射を受ける。これは、背面投影の場合に考慮される必要がある。かくして、引用文献[Feld84]は[Wanq]に利用されるが、以下の規則によって拡張される。

【0010】3a. 背面投影中に、対象物の点を照射するあらゆる実現可能な放射線源位置の中のある投影角度に対し、z方向の実際の位置に最も接近した位置からの寄与分だけが受け入れられる。対象物の点の非常に効率的かつ均衡の取れた露光を実現する方法は、引用文献[Scha96]に提案されている。[Scha96]では、検出器は放射線源円柱体41の表面に配置される（巻き付けられる）。図4において、円柱体41の中心はSに置かれている。円柱体の半径は放射線源・検出器の距離と一致し、螺旋状円柱体12の半径Rとは異なる。螺旋状円柱体は、図1の対象物円柱体13と同軸であり、対象物円柱体13は最大の対象物半径rによって定義される。引用文献[Scha96]において、検出器は、放射線源円柱体41の2本の水平方向の円（断面）によって垂直方向に制限される。しかし、検出器に対し推奨されるべき最大若しくは最適の高さは必ずしも明らかではない。水平方向に関して、検出器は2本の垂直線によって制限され、対象物円筒体をカバーするように設定される。以下の説明では、図1は引用文献[Scha96]のようなある種の従来技術を明確化するため使用されるが、本発明における検出器配置は引用文献[Scha96]並びに[Scha97]における検出器とは相違する。

【0011】[Scha96]における主要な新規性は、相補的な投影の導入である。放射線源円筒体41で獲得される投影データには、放射線源からの放射線が螺旋状円柱体12に到達した場合に分類され、再サンプリング（再割り当て(rebinning)）されるデータが存在する。対象物及び螺旋状円柱体が固定されている間に、放射線源が螺旋

状16に沿って移動する場合を想定する。同一周回中の種々の放射線源位置から放射線の中で螺旋状円柱体の固定点に達する全ての放射線は、相補的な扇形ビームであると称され、この扇形ビームに対する投影データは再割り当て中に作成される。螺旋状円柱体の垂直線上の点から扇状に広がる放射線に対し完全に水平ではなく、また、完全に平面的でもない扇形ビームの組は、相補的な投影を構成する。これらは、以下の再構成手続に利用される。

10 【0012】1. 記録された検出器データを、中心の光線と検出された値を発生させた光線との間の角度の余弦に比例する係数で事前重み付けをする。

2. 相補的な投影に再割り当てする。

3. 水平方向の検出器の行毎に従来のランプフィルタリング技術を用いて、元の投影及び相補的な投影をフィルタリングする。非平面的な検出器であるため、このフィルタは[Feld84]において使用されたフィルタとは僅かに異なる。

20 【0013】4. 投影角毎に、フィルタ処理された投影データは光線に沿って背面投影される。値は、点と放射線源との間の距離に依存した倍率で乗算される。元の位置並びに相補的な円錐ビーム源位置からの全ての値は、対象物の点に関して累積される単一の寄与度に平均化される。引用文献[Scha96]の検出器配置は、対象物の点の完全に均衡が取れた露光を保証しないことが分かる。背面投影中に、各回転角度毎に、対象物の点が1箇所又は数箇所の放射線源位置から照射される[Wanq93]の場合と類似した状況が生じる。相違点は、[Scha96]の場合に、元の投影並びに相補的な投影の両方からの全ての投影データは、背面投影中に利用され、併せて平均化されることである。

【0014】引用文献[Scha97]は、非常に計算上の効率が優れていると言われる別の再構成技術を提案する。[Scha97]の検出器システムは、放射線源円柱体41の表面上に2個の水平方向の円錐を備えた[Scha96]の検出器システムと同一である。再構成は以下の段階を含む。

1. 斜行平行投影に再割り当てする。

40 【0015】2. 記録された検出器データを、中心の光線と検出された値を発生させた光線との間の角度の余弦に比例する係数で事前重み付けをする。

3. 一般化投影から1個の水平方向スライスを再構成する。一般化投影は、水平方向スライス内を通過する仮想的な投影光線の結果であるとみなすことができる。

【0016】3. 1 全ての投影角で1個の一般化投影に対し、このスライスへのフーリエ領域寄与度を計算する。

3. 1. 1 1個の一般化投影において各検出器位置毎にフーリエ領域寄与度を計算する。

50 3. 1. 1. 1 (当該スライスを通る斜行光線を送出する全ての放射線源位置からの) 投影データを、採用さ

れた補間関数から導出されたフーリエ級数成分である事前計算された重みの組みで乗算する。

【0017】3. 1. 1. 2 一般化平行投影の検出器位置における光線毎の丸められたフーリエ変換である単一の組を得るため各フーリエ級数毎の寄与度を加算する。

3. 1. 2 一般化平行投影毎に1種類の丸められた2次元フーリエ変換寄与度を獲得するため、全ての丸められたフーリエ成分に沿ってフーリエ変換(FFT)を計算する。

【0018】3. 1. 3 一般化投影のフーリエ変換をランプフィルタで乗算する。

3. 2 水平方向スライスの2次元フーリエ変換の全ての投影角度からのフィルタ処理されたデータを併合し、空間不変性補間フィルタで再サンプリングする。

3. 3 逆2次元フーリエ変換(FFT)を適用する。

【0019】3. 4 周知のグリidding技術に従って、結果を逆補間関数で事後重み付けをすることによりフーリエ領域内の不完全な補間を補償する。最初の再割り当て段階は、放射線源、検出器及び対象物17が上から描写される場合に最も良く理解される。上方から見ると、円錐状ビームは扇状ビームとして観察される。段階1における再割り当ては、投影データを、その視点からのデータが扇状ビームだけではなく、平行ビームによって生成される組に分類することと等価である。用語“斜行平行投影”は、光線が上方から見た場合には平行であるが、一般的に平行ではなく、水平面に対し傾斜するという事実に由来する。後続の段階を理解するため、図12と同様に対象物の中央で回転軸上に垂直向きに設けられた平面的な仮想検出器122を想定することが望ましい。この投影のための光線を生成する放射線源位置は数個存在する。放射線源円柱体41上の実際の検出器は水平方向に切り取られ、放射線源位置は螺旋16に沿って配置されるので、この仮想検出器の有効領域は左右対称の形状ではない。上方境界131及び下方境界132は、図13に示される如く、湾曲し上下に振られる。これは、本発明のための図10における対応した仮想検出器72の完全に矩形の形状に対する重要な相違点である。正味の影響は、[Scha97]の場合に、可変個の放射線源位置は、種々の傾斜角で所与のスライスを貫通する扇状ビームを生成することである。これらの全てが上記の巧妙かつ複雑な計算段階3. 1. 1. 1及び3. 1. 1. 2の結果に寄与する。本発明において、ただ一つの扇状ビームが見つけれられる。

【0020】・螺旋状放射線軌道(厳密な方法)について

制限された区画、すなわち、長い対象物の着目領域(ROI)を再構成する厳密な方法は、引用文献[Tam95]及び[Eber95]に記載されている。螺旋状走査は、着目領域の垂直方向の拡がりの全体を覆うが、上部及び下部の二

つの円形状走査によって補う必要がある。検出器は、[Field83]及び[Wang93]の場合と全く同様に平面的な表面に配置されるが、検出器ウィンドウは、図1に示されるような放射線源軌道16の2回の連続的な周回の間の領域に制限される。検出器平面上の上方及び下方の切り取り線は、水平ではなく、直線ではなく、また、左右対称でもない。検出器の具体的な拡張の論拠は、以下の再構成技術に引き継がれるラドン平面のための周知の完備条件から得られる。本質的な局面において、この方法は引用文献[Gra87]からの所産である。

【0021】1. 2次元投影毎に、ラドン変換値の微分への部分的寄与度が平面的検出器の多数のラインに沿った線積分を用いて計算される。このため、3次元座標系の原点として特定の対象物の点を選択することが要求される。

2. 走査が終了したとき、すなわち、螺旋状軌道が意図された目標の着目領域(ROI)をカバーしたとき、上記の全ての部分的寄与度が分類され、同一平面上の部分的寄与度が加算される。

【0022】3. 加算結果は、目的関数の着目領域のラドン変換空間内の規則的なグリッドに再サンプリングされる。

4. 微分フィルタでフィルタリング処理をする。

5. 二つの連続的な2次元背面投影段階として3次元背面投影を行う。

一般的に、このような再構成は、前述の方法よりも複雑であり、かつ、コスト高である。また、再構成手続のリズムは、選択された着目領域のサイズによる影響をうける。この再構成手続は、対象物の長さとは無関係に新しい投影毎に繰り返行われる同一の手続の均一なフローではない。2回の余分な円形状走査は、螺旋状部分の滑らかな連続的な平行移動・回転運動を阻害するので、非常に望ましくない。しかし、この方法はある点に関して最適である。所与の螺旋のピッチに対し、この方法は最小のサイズの検出器を利用する。

【0023】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、完全な螺旋状円錐形ビーム走査及び非冗長データ取得が実現される任意の長さの対象物の3次元断層X線撮像装置及び方法の提供を目的とする。

【0024】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、最小サイズの2次元検出器ウィンドウは2回の連続した螺旋の周回によって境界が定められる。光線源は、点から見た場合に正確に180度の回転中に全ての対象物点を照射する。1次元フィルタリングだけが再構成に利用される。回転軸に沿って見た場合の平行ビームへの再割り当ては、事前重み付け又は倍率を必要とすることなく、特に簡単な手続きを実現する。特殊なケースとして、本発明は、1次元検出器アレイを用いた螺旋状扇形ビーム走

査に適用可能である。

【0025】本発明は、被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として成形された表面領域と一致するように拘束され、上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウの高さは螺旋のピッチと一致し、上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、再構成手続きは、特定の検出器値を生ずる光線の角度に依存する係数で事前重み付けを行う段階と、上記検出器の全域で水平方向又は略水平方向にランプフィルタタイプのフィルタでフィルタリングを行う段階と、元の検出器値を生じた上記光線の方向に沿ってある倍率で背面投影を行う段階とを含み、実際の事前重み付けと実際のフィルタ設計と実際の倍率は、上記検出器の物理的な実施例と、検出されたデータに利用された再割り当てとに依存することを特徴とする。

【0026】また、本発明は、被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として成形された表面領域と一致するように拘束され、上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウの高さは螺旋のピッチと一致し、上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、再構成手続きは、入ってくる円錐状ビーム投影毎に、上記回転軸に沿って見えるような平行投影に再割り当てする段階と、上記再割り当てされたデータを上記回転軸上の仮想検出器平面に配置し、再サンプリングする段階と、上記検出器平面内の全ての水平方向に沿ってランプフィルタリングを行う段階と、一定の倍率を用いて元の光線の方向に背面投影する段階とを含むことを特徴とする。

【0027】また、本発明は、被検査対象物が円錐状ビーム光線源及び検出器と相対的に平行移動と回転とを行う長い対象物の3次元断層X線撮像の装置及び方法であって、2次元検出器は上記光線源に対向するウィンドウに制限され、上記ウィンドウは、回転軸に中心が置かれ上記光線源を通過する円柱体に取り付けられた平行四辺形として成形された表面領域と一致するように拘束され、上記円柱体の長手方向に測定された上記ウィンドウ

の高さは螺旋のピッチと一致し、上記ウィンドウの幅は再構成されるべき上記対象物の最大の幅を覆うように決められ、上記ウィンドウの上部境界及び下部境界は、固定した対象物に対する上記光線源経路の二つの連続した周回と一致し、再構成手続きは、入ってくる円錐状ビーム投影毎に、上記回転軸に沿って見えるような平行投影に再割り当てする段階と、上記再割り当てされたデータを上記回転軸上の仮想検出器平面に配置し、再サンプリングする段階と、一般化投影及びフーリエ変換技術を用いて同時に一つの水平方向スライスを再構成する段階とを含むことを特徴とする。

【0028】

【発明の実施の形態】本発明は、引用文献[Tam95]に提案されているものと同様に、螺旋状放射線軌道の2回の最も接近した周回により垂直方向に制限された露光ウィンドウによって特徴付けられる最適、最小コストの2次元検出器を利用する。しかし、この検出器ウィンドウを利用する動機及び作用は、[Tam95]及び[Eber95]に記載された動機及び作用とは著しく異なる。この露光ウィンドウの特有の意義を説明するため、再度図1を参照する。図1には、放射線源Sと、螺旋状円柱体12の周りに巻かれた検出器11と、内側の対象物円柱体13とが示されている。以下、特に断らない限り、対象物円柱体は、z軸に関して反時計回りに回転し、右側の螺旋を上方に平行移動し、一方、放射線源S及び検出器11は空間(x, y, z)に固定されている場合を想定する。

【0029】図2には配置の平面図が示されている。図3には、平面上に広げられ伸ばされた検出器ウィンドウが示されている。図1及び3は、図3の光線が放射線源から紙面の上方に向かって入射すると理解される場合に限り矛盾しないことに注意する必要がある。図4には、Sに中心が置かれ、螺旋状円柱体12の半径の2倍の半径を有する放射線源円柱体41上に配置された検出器が示されている。図1、2、3及び4は、細部には相違があるとしても、原則として引用文献[Dan97a]に記載された図1乃至4と同一である。

【0030】上記の通り、図1に示された2次元検出器11は、螺旋状円柱体12に巻き付けられる。図1において紙面に広げられ伸ばされた同一の検出器11の表面は、2本の垂直線31及び32と2本の傾斜した線33及び34の4本の直線によって境界を定められている。この境界内の領域で、対象物17は投影され、すなわち、円錐状ビーム源からの光線がアクティブ検出器素子に到達する。水平方向に関し、この領域は対象物円柱体13を覆うように拡張されるべきであり、ビーム源から見た場合、ある幅、若しくは、扇形角度 γ_{max} に変化する。一例として、対象物円柱体が、

$$\text{半径 } r = R/\sqrt{2}$$

を有する場合を考える。但し、Rは螺旋状円柱体12の半径である。すなわち、螺旋状円柱体12上で水平方向

に、検出器は360度の中の180度の回転角をカバーし、放射線源側から見た場合、検出器11は、-45度から+45度までの扇形角度をカバーする。原則として、検出器は、1回転まで拡張してもよく、その場合、*

$$\tan \varepsilon = v / (\omega R) = h / (2\pi R) \quad (1)$$

の勾配で円柱体12の表面と交差する。但し、 v は垂直方向平行移動速度であり、 ω は回転の角速度であり、 h は螺旋のピッチである。

【0031】本発明の核心部には、以下の検出器・露光ウィンドウの特性がある。円柱状の長い対象物の各点10は、検出器ウィンドウの境界の内側と合う半径を有する場合、対象物の実際の点から見たときに正確に180度の回転角の間に露光（投影）される。この特性の形式的な論証は[Dan97b]に記載されているが、ここではこれ以上説明しない。この新しい十分条件は、ある点若しくは点の組（すなわち、長い対象物の一部）が上記の意味で完全に露光されると即座に、その一部の再構成を行うことができるというように解釈される。これは、実際の再構成を開始する前にラドン空間を完全に作成するため着目領域全体が露光される必要がある[Tam95]及び[Eber95]の状況とは異なる。

【0032】180度の露光の一例は図1の線18に示されている。この例では、3個の対象物の点 Q_1 、 $-Q_1$ 、 Q_2 が含まれ、露光の開始及び終了の二つの位置で示されている。この線の端点は移動し、外側の円柱体に接触するので、回転中に両端は放射線源 S と一致する。このような線は、以下E線と呼ぶ。この線は図2においても同一の2点に示されている。

【0033】上記の通り、対象物は上方に移動し、上から見た場合に反時計回りに回転していると想定する。図30の検出器ウィンドウにおいて、線 Q_1 、 $-Q_1$ 、 Q_2 は、下方の境界34と、単一の点 Q_1 で交差する。軸14の周りに角度 $\pi + 2\gamma$ だけ回転した後、この線は、検出器から離れる放射線源から再び境界33上の単一の点 Q_1 のように見える。明らかに、入口と出口との間で、放射線源は、この線上の任意の点から見えるように正確に180度回転する。この線は全く任意に選択されているので、同じことが、完全に露光されたE線に属する対象物の全ての点に対し成り立つ。図1以外の図2及び3において、別のE線である線 P_1 、 $-P_1$ 、 P_2 が挿入される。図2の固定した放射線源・検出器システムの場合、この線 P の入口と出口の位置は、線 Q の対応した位置に対し正確に反転する。したがって、この線 P は、露光軸121周りの回転角 $\pi - 2\gamma$ の間に線 Q よりも放射線源に接近する。線 P 上の点は、図3に示される如く、異なる短い曲線に沿って検出器表面上を移るが、これらの点から見た場合、放射線源は点の周りを正確に180度回転する。

【0034】引用文献[Dan97b]には、各対象物の点が全く同一の線に属することが示されている。したがって、

* -90度から+90度までの扇形角度を有し、対象物円柱体が全ての方向で螺旋まで延びることが許容される。傾斜した線33及び34は、

図1の検出器システムは、各点毎に、すなわち、対象物全体に対し完全、かつ、十分に均衡が取られたデータ取得を実現する。また、上記の論証から、対象物は、長い対象物の増加部分（E線の新しい組毎に）が完全に露光されるベースと同じベースで再構築できることが必要である。

【0035】検出器の物理的な実現及び配置は、図4に示されるように種々の方法で行うことが可能である。例えば、検出器は、螺旋状円柱体12自体、放射線源円柱体41又は平面42の上に配置してもよい。何れの場合も、検出され利用されるデータは図3によって定義されるウィンドウに拘束される必要がある。本発明において、同一の検出器データを使用して、[Tam95]及び[Eber95]の複雑な再構成は、非常に簡単な手続きに置き換えられる。この手続きを説明するため、進行中の走査及び再構成を所定の着目領域に制限する必要がなく、この処理のための3次元原点を指定する必要もない。その代わり、走査及び再構成は、一定に進行するフローと同じであり、原則として始まりも終わりも無く、新しい投影は、先行の結果に境目無く吸収され、組み込まれる。この目的のため、新しい投影毎の以下の一般的な再構成手順が[Dan97a]に提案されている。

- 【0036】1. 再割り当てをする。
2. （再割り当て及び検出器タイプに依存して）事前重み付けを行う。
3. （フィルタ設計が再割り当て及び検出器タイプに依存して場合に）検出器全体にランプフィルタによる1次元フィルタ処理を行う。
4. 再割り当てのタイプと、平面、円柱などの検出器タイプに依存して、倍率を用いて入射する光線方向に沿った背面投影を行う。

【0037】この手続の特殊なケースは、以下に詳細に説明する平行投影への再割り当てである。図5は図1の正面図であり、同図において6本の光線51、52、53、54、55及び56はx軸に置かれた放射線源 S から入射する。図6には上方から見た平面図が示され、同図において、対象物は固定され、放射線源及び検出器が回転する。放射線源が位置 S_α にあるとき、（この視点では線条に見える）3本の扇形ビーム61、62及び63が観察され、このビームは図5における6本の光線により構成され、3個の投影の組 $t(\alpha, \gamma_1)$ 、 $t(\alpha, 0)$ 、 $t(\alpha, -\gamma_1)$ を生成する。2本の外側の光線は、投影 $t(\alpha + \gamma_1, 0)$ 及び $t(\alpha - \gamma_1, 0)$ を夫々に生成する他の2個の放射線位置から入射する他の2本の光線64及び65と平行である。明らか

に、(光線のように見える)平行な扇形ビームからのデータがまとめられるように投影データが再サンプリング*

$$[p(\alpha + \gamma, \gamma) \leq t(\alpha, \gamma)] \equiv [p(\beta, \gamma) \leq t(\beta - \gamma, \gamma)]$$

(2)

図7に示される如く、組pは、一方向の平行なビームによって発生されたとみなすことができる。一般性を失うことなく、この方向は、図7において水平方向である。これらの光線と垂直に仮想検出器72が垂直平面上に設置される。

【0038】図7における平行投影用の検出器ウィンドウ71は、図9の紙面に広げられ、伸ばされる。平行投影用の完全な検出器位置は、異なる円錐状ビーム検出器位置から生じた垂直線83、84及び85から集められる。得られた平行ビーム検出器領域は、円錐状ビーム検

*される。これは、以下の二つの等価的な割り当てのいずれかを用いて行われ得る。

※出器と同等に傾斜しているが、一方向で2分の1に短縮される。図9の検出器の最上部81及び最下部82は、本例において比較のためだけに設けられた他の検出器ウィンドウの外形をなす。最もよく理解できるように、このウィンドウは、螺旋状円柱体12に写像されたとき、[Scha96]及び[Scha97]の最小サイズ検出器に対応する。所与のピッチ=h並びに所与の最小扇形角度 γ_{\max} に対し、この検出器ウィンドウの高さは、

【0039】

【数1】

$$\frac{2v(\pi + \gamma_{\max})}{\omega R \cos \gamma_{\max}} = \frac{h}{\cos \gamma_{\max}} \frac{\pi + \gamma_{\max}}{\pi} = h \left(\frac{1 + \frac{\gamma_{\max}}{\pi}}{\cos \gamma_{\max}} \right) \quad (3)$$

【0040】である。この式は、[Scha96]及び[Scha97]の検出器冗長性が扇形角度の増加に対しかなり素早く変化することを意味する。平行投影の光線は、螺旋の特定の区画に設けられた垂直方向の扇形ビームを備えた放射線源の組から発射する。紙面に広げられた場合、この放射線源螺旋の部分73は、図8の検出器71に重ね合わされる。部分73は、検出器と同じ傾斜の線の形をなすが、符号が反転している。このため、本発明において、垂直中間平面内の仮想検出器72は、対象物円柱形の直径に一致する幅と、ピッチの半分=h/2に正確に一致する高さとを有する完全な矩形によって境界を定められる。これは、放射線源経路73の上方へのチルト運動が検出器の下方へのチルト運動によって厳密に補償される図9に示されている。また、仮想検出器72から放射線源までの距離は、実際の検出器までの距離と常に一致するので、実際の検出器の高さhは、常に仮想検出器で厳密にh/2に縮小される。図10は、再割り当て-再サンプリング手続の2番目の部分、すなわち、R内の等距離グリッド点から、 $y = R \sin \gamma$ 内の等距離グリッド点までを示す図である(尚、x及びyは、再割り当てされた平行投影座標系の座標として使用される場合もある)。

【0041】上記の完全な矩形である仮想検出器領域の特性は図11に示されている。同図の(A)、(B)及び(C)は、平行投影系の直交した3方向から見え方を表す。7個の放射線源位置が示されている。同図の

(A)及び(B)において、放射線源位置sの中の一つの位置からの投影が線d-eとして示されている。明らかに、同図の(B)において、3点s、d及びeは螺旋上にある。また、仮想検出器の平面は、上方の光線111で点sと点dのちょうど真ん中にある点と、下方の光

線112で点sと点eの間にある点の2点で螺旋と交差する。したがって、仮想検出器の高さは、h/2であり、中間点は任意のsに対しx軸上に存在する。これは、仮想検出器が水平方向の境界線を有する矩形であることを明らかにする。

【0042】かくして、十分かつ冗長ではないデータを送出する特殊な検出器ウィンドウが存在するという見識を用いる場合、この検出器で円錐状ビームデータが取得され、実際の再構成のために有利な状況を作るため円錐状ビームデータが平行投影データに再割り当てされる。完全な手続は、以下の3段階を含む。

1. 図6、7、8、9、10及び11に記載されるように平行投影に再割り当てをする。

【0043】2. 仮想検出器平面内の水平方向行に沿って従来のランプフィルタでフィルタ処理をする。

3. 一定の倍率を用いて元の光線の方に背面投影する。

本発明において、平行な再割り当ての後、1次元フィルタリングが図10の仮想検出器72の水平方向行に沿って行われる。[Scha96]及び[Scha97]において、フィルタリングは、図4に弧41として示されるような放射線源円柱体に配置された検出器の水平方向行に沿って行われる。図13には、仮想検出器平面121に写像された検出器が示されている。実際の検出器の水平方向行は、水平方向でも直線でもない仮想検出器平面121上の曲線に写像される。明らかに、本発明の様な真直ぐな水平方向行ではなく、仮想検出器平面内のかかる曲線に沿ったフィルタリングを行う場合、再構成の結果はかなり異なる。

【0044】上記の如くであるとしても、上記手続きの段階3.は、[Scha97]の対応した段階3の簡単化された

変形バージョン、すなわち、一般化投影からの一つの水平方向スライスの再構成で置き換えても全く構わない。単純化は、本発明による完全に均衡が取れたデータ獲得に起因する。先験的に、図9に示される如く一般化投影内の検出器位置に寄与する全く同一の放射線源位置が存在することが分かっている。そのため、全ての投影において失われたデータ又は冗長なデータが存在しないので、多数の露光の寄与度を記憶する必要がない。この状況は、平行走査システムの垂直区画を表す図12に示された[Scha97]の場合とは異なる。実際の検出器125は、図9において非常に高い位置にあるので、仮想検出器121、122及び123は、隣り合う半周回ずつ垂直方向に重なる。したがって、(紙面のような)垂直平面において、対象物の水平方向スライスは、軌道上の1個ではなく3個の放射線源位置から部分的に照射される。このように不規則に分布した露光の冗長性は、最小サイズの検出器のための[Scha97]の仮想検出器ウィンドウを表す図13においても反映される。上方境界131及び下方境界132は、夫々、図8の境界81及び82と同一であり、仮想平面的検出器に写像されている。

【0045】本発明により提案された2次元検出器配置の殆どの実施例において、検出器素子は放射線源円柱体41に設けられる。図4を参照のこと。適切な円錐形角*

$$z_{top} = (\nu/\omega R) \cdot (\pi + 2\gamma/\cos\gamma)$$

及び

$$z_{bottom} = (\nu/\omega R) \cdot (\pi - 2\gamma/\cos\gamma)$$

であることが分かる。高さHは、

$$H(\gamma) = z_{top} + z_{bottom}$$

$$= (\nu/\omega R) \cdot (2\pi/\cos\gamma) = h/\cos\gamma \quad (5)$$

のように変化し、式中、hは従前通りのピッチである。かくして、放射線源円柱体上で獲得されたデータは、図14の不均一に傾斜した検出器領域から、菱形の検出器素子を備え垂直線及び均一に傾斜した線とによって画成された図3(並びに図14)の検出器のグリッドまで再サンプリングされるべきである。投影データが、図10の平面的仮想検出器上の平行投影にもう一度再サンプリングされるとき、最終的なグリッドパターンは完全に矩形になる。

【0048】本発明の重要な特殊なケースは、図14の検出器141(並びにピッチ)の高さが、図15に示されている検出器素子151の単一行150まで削減されるときである。この特殊なケースでも、検出器素子の高さは、上記の式(5)から予測されるように、扇形角度が増加すると共に増加することに注意する必要がある。一般的に、図15の検出器アレイは、2次元検出器ではなく、1次元検出器アレイとしてみなされる。1次元アレイ検出器は、[King93]によって表されるような従来の螺旋状ビームX線断層撮像に使用される。検出器は、一般的に放射線源円柱体41の表面に配置される。但し、図15の検出器はそうように設計された検出器ではな

*度を与えられた場合、検出器素子は、入射光線に対し垂直以外の向きで対向する。大きい円錐形角度をカバーするように作られた検出器の場合、検出器素子は、点Sに中心がある球の内側に取り付けるのが適当である。これにより、全ての検出器が入射する光線に正確に対向することが保証されるか、若しくは、少なくとも簡単に保証できるようになる。

【0046】図14には、紙面に広げられた螺旋状円柱体上の検出器ウィンドウ11を示す図である。同図において、検出器ウィンドウは、放射線源円柱体41の弧に写像された同じ検出器ウィンドウの上に重なる。紙面上に広げられた場合、放射線源円柱体41の弧に写像された検出器ウィンドウは、図14において符号141で示されている。図4の幾何図形的配置を考慮すると、対象物円柱体13に接近する最小の実現可能な半径を有する放射線源円柱体の弧43に検出器を配置する方が最適である。しかし、かかる検出器の幾何図形的配置は、検出器ウィンドウ141と厳密に適合するので、一般性を失うことなく、ウィンドウ141の幾何図形的配置が議論される。

【0047】検出器141は、中央で検出器ウィンドウ11と一致するが、 γ と共に変化するので、検出器の最上部の点及び最下部の点は、夫々、

(4)

い。その代わりに、検出器素子は一定の高さであり、放射線源円柱体表面上に傾斜した形ではなく、水平方向に一直線で配置される。

【0049】その結果として、十分なデータを保証するため、検出器素子の高さがz方向の分解能が減少する式(3)のように増加されるか、或いは、螺旋のピッチが同じ倍率で減少されるべきであり、本発明よりも走査効率を低減し、照射量を増加させる。また、走査は、非常に冗長なデータを獲得するので、これに伴う再構成手続きは、多重露光を補償するため複雑な重み付け係数を利用する必要がある。本質的に、[King93]は、[Scha96]に対する先行技術であり、扇形ビームによる方式である。したがって、螺旋状扇形走査の場合、本発明は、[Scha96]及び[Scha97]に対する有利さと同じ有利さを[Kknq93]に対してもつ。例えば、図15に従って設計され、配置された検出器と共に本発明を使用する場合、データ取得は、完璧であり、かつ、冗長性が無く、再構成手続きは、再割り当て、1次元ランブフィルタリング、及び、一定の倍率による背面投影の3段階を含むように簡単化され得る。

50 ー引用文献のリスト

[Dan97a] P.E.Danielsson, "Forfarande och for tomo grafering", スウェーデン特許出願No.9700072-3, 1997年1月14日出願

[Dan97b] P.E.Danielsson, Paul Edholm, Jan Eriksson, Maria Magnusson Seger, "Towards Exact 3D-Reconstruction for Helical Scanning of Long Objects", conf. Recoed from 1997 Int Meeting on Fully Three-Dimensional ImageReconstruction, Nemacollin, PA, June 25-28, 1997

[Feld84] L.A.FeldKamp, L.C.Davis, J.W.Kress, "Practical Cone Beam Algorithms", Journal of Optical Soc. Am. vol.A6, pp.612-619, 1984

[Wan93] G.Wang, T.H.Lin, P.C.Cheng, D.M.Shinozaki, "A General Cone-Beam Reconstruction Algorithm", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.12, pp.486-496, 1993

[Scha96] S.Schaller, T.Flohr, P.Steffen, "A New-Approximate Algorithm for Image Reconstruction in Cone-Beam Spiral CT at Small Cone Angles", Conference Record, IEEE Medical Imaging Conference, pp.1703-1709, Nov.1996, Anaheim, CA

[Scha97] S.Schaller, T.Flohr, P.Steffen, "New Efficient Fourier-Reconstruction Method for Approximate Image Reconstruction in Spiral Cone-BeamCT at Small Cone Angles", Proc. SPIE Med. Imaging Conf., Newport Beach, CA, Feb.22-28, 1997

[Tam95] K.C.Tam, "Three-Dim. Computerized Tomography Scanning Method and System for Large Objects with Smaller Area Detectors", 米国特許No.5,390,112, 1995年2月14日

[Eber95] J.W.Eberhard, K.C.tam, "Helical and Circle Scan Region of Interest Computerized Tomography", 米国特許No.5,463,666, 1995年10月31日

[Gra87] G.T.Hermann, A.K.Luis, F.Natterer編, Lecture Notes in Mathematics, Springer, 1991に収められた "Mathematical Methods in Tomography"の中の P. Grantat, "Mathematical Framework of Cone-Beam 3D Reconstruction via the First Derivative of the Radon Transform"

[King93] K.F.King, A.H.Lonn, C.R.Crawford, "Computational

* er Tomographic Image Reconstruction Method for Helical Scanning Using Interpolation of Partial Scans for Image Construction", 米国特許No.5,270,923, 1993年12月14日

【図面の簡単な説明】

【図1】2次元検出器システムの構成図である。

【図2】2次元検出器システムの平面図である。

【図3】平面に展開された検出器ウィンドウを示す図である。

【図4】放射線源円柱体に配置された検出器を示す図である。

【図5】図1に対応した正面図である。

【図6】図1に対応した平面図である。

【図7】平行投影用の検出器ウィンドウの説明図である。

【図8】従来技術による検出器の説明図である。

【図9】展開された平行投影用の検出器ウィンドウの説明図である。

【図10】再割り当て-再サンプリング手続の2番目の部分の説明図である。

【図11】(A)、(B)及び(C)は、完全な矩形である仮想検出器領域の特性を示す図である。

【図12】従来技術による平面的な仮想検出器を示す図である。

【図13】従来技術による仮想検出器平面に写像された検出器を示す図である。

【図14】展開された螺旋状円柱体上の検出器ウィンドウを示す図である。

【図15】検出器素子の単一行を示す図である。

【符号の説明】

11 検出器

12 螺旋状円柱体

13 対象物円柱体

14 回転軸

15 x y 平面

16 螺旋

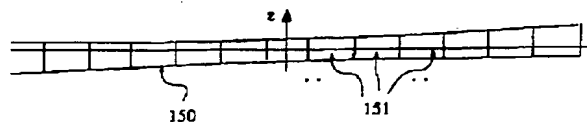
17 対象物

18 対象物の点を通る線

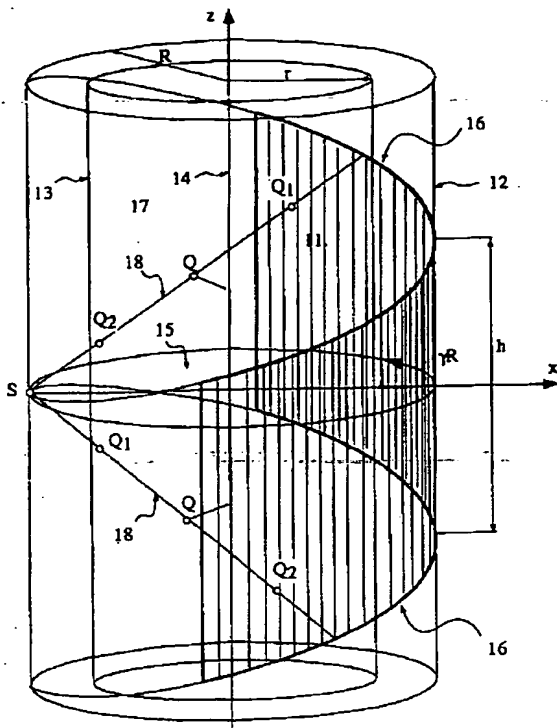
S 放射線源

Q₁, Q₂, Q₃ 対象物の点

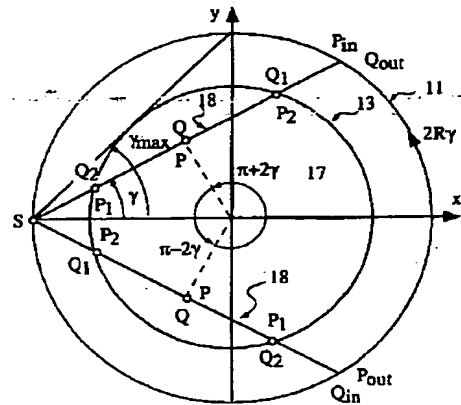
【図15】



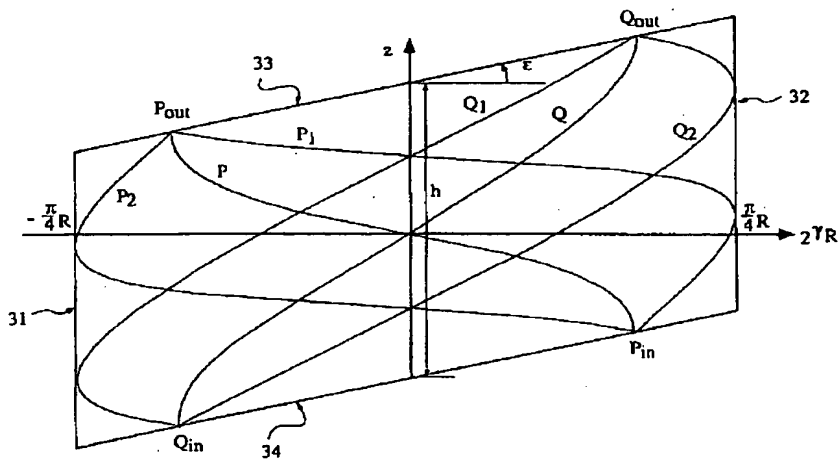
【図 1】



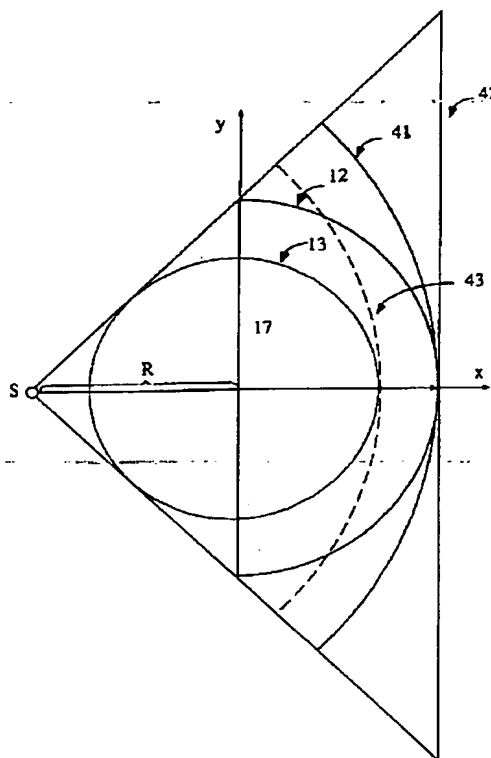
【図 2】



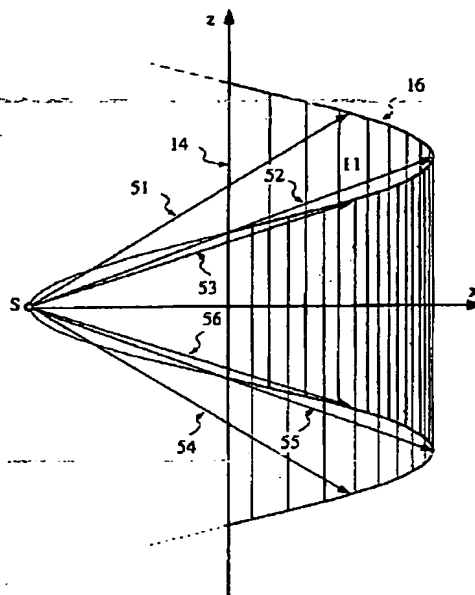
【図 3】



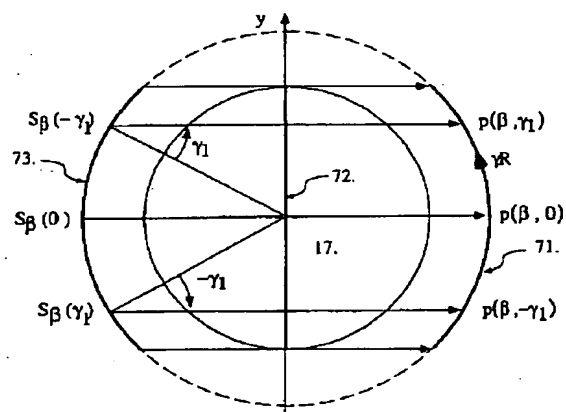
【図 4】



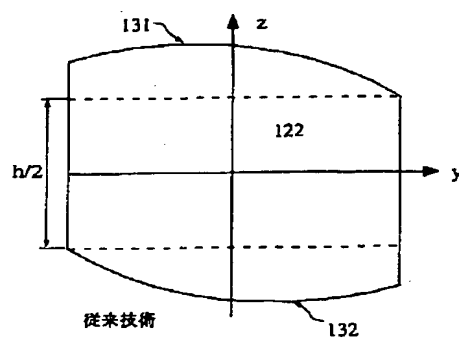
【図 5】



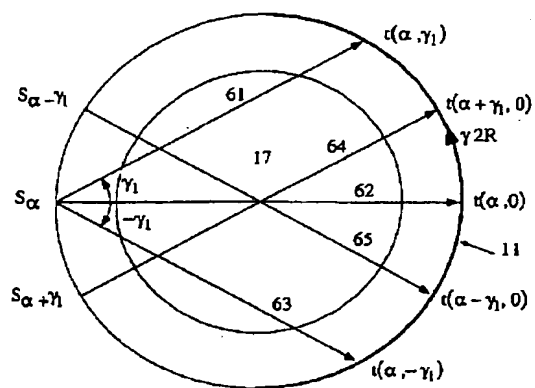
【図 7】



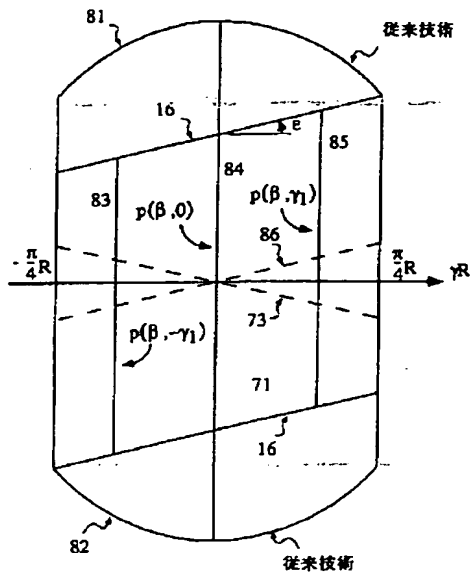
【図 13】



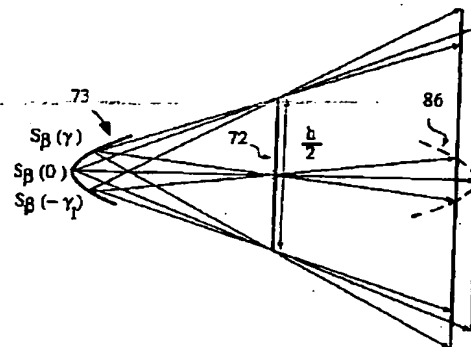
【図 6】



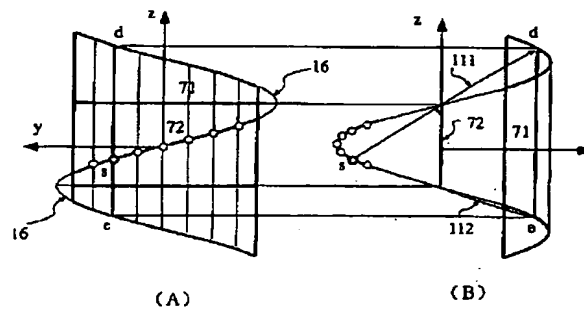
【図8】



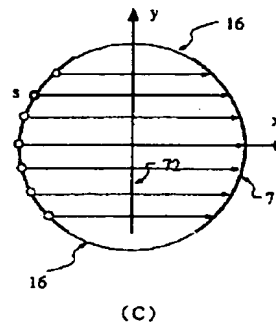
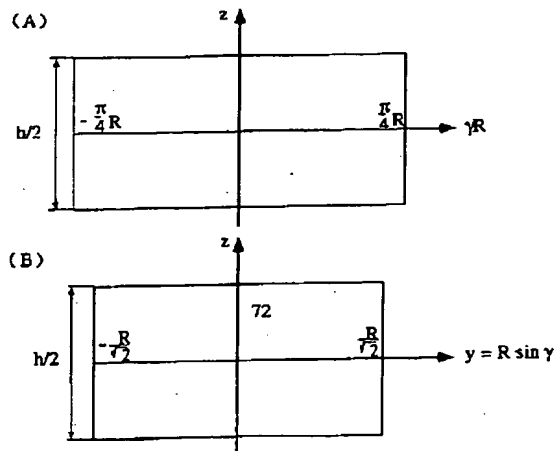
【図9】



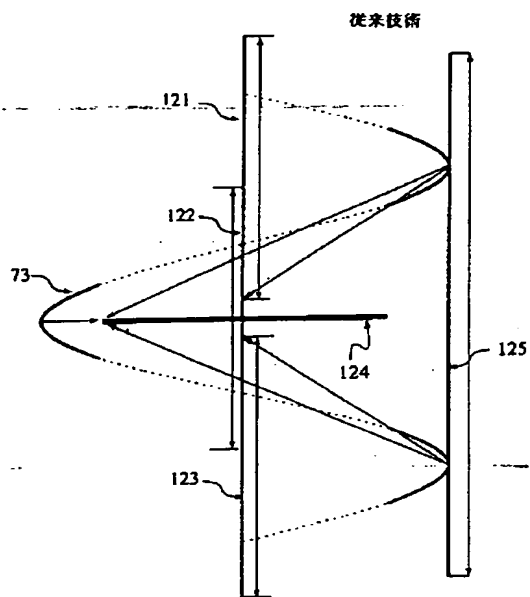
【図10】



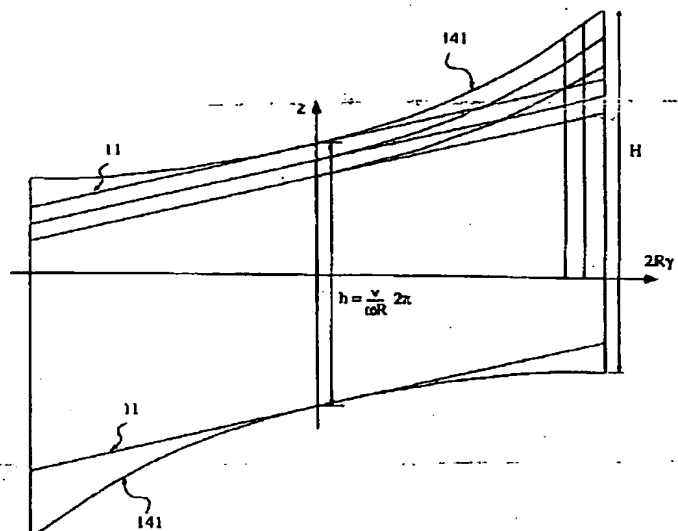
【図10】



【図12】



【図14】



フロントページの続き

(71)出願人 590000248
 Groenewoudseweg 1,
 5621 BA Eindhoven, Th
 e Netherlands